<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-2-64-71>

УДК 518.5+519.24

Методика расчета коэффициента коррекции для линейно-корректируемых систем

С. Г. Андреев, Д. Е. Доновский, В. Г. Старцева, Н. А. Ушаков

Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина», Снежинск, Челябинская область, Российская Федерация

Представлена методика расчета коэффициента коррекции для линейно-корректируемых систем, разработан алгоритм расчета, предложенный для оперативного расчета основного задания. В алгоритме расчета коэффициента коррекции используется принцип суперпозиции составляющих функций, каждая из которых представляется аппроксимирующей зависимостью.

Ключевые слова: методика, алгоритм, основное задание, коэффициент коррекции, корреляционная матрица, числовой материал

Для цитирования: Андреев С. Г., Доновский Д. Е., Старцева В. Г., Ушаков Н. А. Методика расчета коэффициента коррекции для линейно-корректируемых систем // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 2. С. 64–71. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-2-64-71>

For citation: Andreev S. G., Donovskiy D. E., Startseva V. G., Ushakov N. A. Method of correction factor calculation for linear reference systems // Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”. 2021. No. 2. P. 64–71. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-2-64-71>

Поступила 16.11.2020 Отрецензирована 18.11.2020 Одобрена 27.04.2021 Опубликовано 18.06.2021

Введение

С развитием электронных технологий появились специальные возможности управления системами летательных аппаратов (ЛА) на основе измерения сигналов датчиков положения ЛА и вычисления на их основе, в процессе полета ЛА на атмосферном участке траектории, значений функционалов.

При движении ЛА возможны отклонения параметров движения от заданных величин, которые приводят к отклонениям моментов срабатывания системы ЛА (рис. 1).

Одним из путей повышения точности срабатывания системы ЛА является практическая возможность парирования возникающего отклонения ЛА от расчетной траектории в процессе его автономного полета.

В практике разработки ЛА нашли применение линейно корректируемые системы (ЛКС), позволяющие на основе измеренного рассогласования наблюдаемого функционала и заранее рассчитанного коэффициента коррекции парировать отклонения, приблизив координату срабатывания системы к заданной

Рис. 1. Изменение высоты срабатывания при отклонениях параметров движения

© Андреев С. Г., Доновский Д. Е., Старцева В. Г., Ушаков Н. А., 2021

координате цели. В ЛКС на основе измеренного рассогласования и заранее назначенного коэффициента коррекции K корректируется момент срабатывания системы – частично парировается возникающее отклонение; повышается точность срабатывания ЛКС.

Для обеспечения готовности ЛКС к своевременной выдаче команды в заданной точке на траектории в аппаратуру ЛА вводится основное задание (ОЗ). Основное задание рассчитывается перед началом полета и до начала функционирования ЛКС. В составе ОЗ задается коэффициент коррекции K , который должен быть вычислен с помощью специализированной вычислительной системы (СВС).

Разработка методики расчета коэффициента коррекции, используемого для формирования команды ЛКС в заданной точке на траектории, определяет актуальность выполненной работы.

Цели и задачи работы

Поставлена задача разработать методику расчета коэффициента коррекции. Разработка методики выполнена с учетом изученных теоретических вопросов коррекции функционалов для линейно корректируемых систем.

Для решения задачи выполнены следующие работы.

1) Исследованы диапазоны изменения коэффициента коррекции для области изменения влияющих параметров. Определено, что коэффициент коррекции зависит от многих переменных: баллистических параметров ЛА (V, θ, H), инструментальных ошибок системы срабатывания ($ИО^{CCP}$), ошибок внешних систем ($ИО^{CV}$), $K \sim f(V, \theta, H, ИО^{CV}, ИО^{CCP})$.

2) Рассмотрены ограничения, связанные с программной реализацией алгоритма расчета коэффициента коррекции в специализированных вычислительных системах.

3) Рассмотрены несколько способов расчета коэффициента коррекции для линейно-корректируемых систем.

4) В качестве способа расчета коэффициента коррекции для линейно-корректируемых систем предложено использовать конечное аналитическое выражение.

Цель работы

Разработать алгоритм, отвечающий требованиям алгоритмической реализации при оперативном расчете ОЗ.

Требования к алгоритму

Алгоритм расчета в реальном масштабе времени должен обеспечивать:

- требуемую точность расчета ОЗ;
- минимальные алгоритмические, информационные и временные затраты.

Алгоритм должен обладать простотой и наглядностью.

Поскольку коэффициент коррекции используется для определения параметров срабатывания системы, то погрешность расчета коэффициента коррекции будет влиять на точность срабатывания системы. В этой связи до выбора алгоритма расчета коэффициента коррекции определены требования к точности его расчета.

Способ, на основе которого определены требования к точности расчета коэффициента коррекции, заключается в оценке точности срабатывания системы при вариации погрешности коэффициента коррекции [1]. Далее на основе определенных требований по точности расчета коэффициента коррекции решена задача по определению требований к погрешности расчета отдельных составляющих коэффициента коррекции путем решения обратной задачи теории ошибок – определению составляющих по заданной результирующей величине [2].

Ошибка расчета включает в себя несколько составляющих, обусловленных разными процессами:

$$\Delta K_{PACH} = \sqrt{\Delta K_{MET}^{ДОП2} + \Delta K_{ВЫЧ}^2 + \Delta K_{ЦЕР}^2}, \quad (1)$$

где $\Delta K_{MET}^{ДОП}$ – допустимая методическая погрешность, связанная с упрощением алгоритма расчета,

$\Delta K_{ВЫЧ}$ – погрешность расчета коэффициента коррекции в специализированных вычислительных системах,

$\Delta K_{ЦЕР}$ – погрешность приведения коэффициента коррекции к цене младшего разряда для представления его в виде кода.

Способ расчета коэффициента коррекции

В ходе исследований рассмотрены следующие способы определения коэффициента коррекции:

- способ перебора;
- способ на основе конечного аналитического выражения.

Способ перебора заключается в определении оптимального значения коэффициента коррекции K на заданной области изменения влияющих параметров путем поиска локального минимума отклонения функционалов от номинальных значений при вариации действующих возмущений. Способ является достаточно трудоемким, так как требует большого количества расчетов с использованием метода статистических испытаний (Монте-Карло) [3].

Рис. 2. Коррекция в оптимальную плоскость:

- система координат ΔL O ΔH ,
- точка «О» соответствует положению ЛА на расчетной траектории,
- точка «А» соответствует положению ЛА на реальной траектории,
- ΔH , ΔL – отклонения по высоте и дальности от расчетной траектории,
- $\psi = \arctg \frac{1}{\rho_{L/H}}$ – угол наклона линии регрессии,
- $\rho_{L/H} = \frac{\sigma_L}{\sigma_H} \cdot K_{LH}$ – коэффициент регрессии,
- K_{LH} – коэффициент коррекции,
- θ – угол наклона вектора скорости к горизонту,
- ϕ – угол, определяющий положение оптимальной плоскости относительно вертикальной.

Способ на основе конечного аналитического выражения в своей основе использует регрессионную связь отклонений характеристик срабатывания системы (высоты ΔH , дальности полета ΔL , расстояния ΔR) от заданной координаты срабатывания. При этом полагают, что пара $(\Delta H, \Delta L)$ имеет нормальный закон распределения с характеристиками: математическим ожиданием – $MO(\Delta H)$, $MO(\Delta L)$, среднеквадратическим отклонением (СКО) $\sigma(\Delta H)$, $\sigma(\Delta L)$ и коэффициентом корреляции $\rho_{\Delta H \Delta L}$. Уравнение регрессии позволяет оценить среднее значение отклонения по дальности ΔL от расчетной (заданной) точки при известном отклонении по высоте ΔH с использованием оптимального значения коэффициента коррекции K .

Для выбора алгоритма расчета коэффициента коррекции были проанализированы три случая проведения коррекции:

- 1-й случай – коррекция точки срабатывания при минимизации отклонения по высоте (коэффициент K_H);
- 2-й случай – коррекция точки срабатывания при минимизации отклонения по дальности (коэффициент K_L);
- 3-й случай – коррекция точки срабатывания в оптимальную плоскость (коэффициент K_R).

Для каждого случая:

- проведены баллистические расчеты;
- выполнены оценки разброса координат срабатывания ЛКС;
- проведена минимизация погрешности срабатывания ЛКС с использованием коэффициента коррекции, полученного разными способами.

Расчеты позволяют определять вероятностные характеристики параметров движения ЛА и параметров срабатывания системы методом статистических испытаний (Монте-Карло) на основе имитационных моделей пространственного движения ЛА и функционирования ЛКС для принятой системы возмущающих факторов.

На рисунке 2 представлена графическая интерпретация коррекции точки срабатывания в оптимальную плоскость.

Для рассмотренных случаев проведения коррекции, с учетом принятых допущений и определений (нормальный закон распределения, использование оператора дисперсии к текущим отклонением по высоте, дальности и расстоянию), путем решения уравнения относительно коэффициента коррекции определены формулы для его вычисления.

Формулы расчета коэффициента коррекции для трех описанных случаев проведения коррекции представлены следующими соотношениями:

$$K_H = \frac{(\sigma H_k^*)^2 + \rho(H_k^*, H_v^*) \sigma H_k^* \sigma H_v^*}{(\sigma H_k^*)^2 + 2\rho(H_k^*, H_v^*) \sigma H_k^* \sigma H_v^* + (\sigma H_v^*)^2}; \quad (2)$$

$$K_L = K_H - \frac{\rho(L_k, H_k^*) \sigma L_k \sigma H_k^* + \rho(L_k, H_v^*) \sigma L_k \sigma H_v^*}{(\sigma H_k^*)^2 + 2\rho(H_k^*, H_v^*) \sigma H_k^* \sigma H_v^* + (\sigma H_v^*)^2} \operatorname{tg} \theta_k^{\text{ном}}; \quad (3)$$

$$K_R = K_H - \frac{\rho(R_k, H_k^*) \sigma R_k \sigma H_k^* + \rho(R_k, H_v^*) \sigma R_k \sigma H_v^*}{(\sigma H_k^*)^2 + 2\rho(H_k^*, H_v^*) \sigma H_k^* \sigma H_v^* + (\sigma H_v^*)^2} \cos \theta_k^{\text{ном}}. \quad (4)$$

Составляющими коэффициентов коррекции при условии минимизации по высоте K_H , дальности K_L и в оптимальную плоскость K_R являются СКО и коэффициенты корреляции наблюдаемых функционалов, баллистический параметр θ – угол наклона траектории.

Формулы (2), (3), (4) являются основой для разработки алгоритма расчета коэффициента коррекции, используемого при оперативном расчете ОЗ в СВС.

Алгоритмы расчета коэффициента коррекции

С учетом рекомендаций со стороны разработчиков специализированных вычислительных систем разработаны разные алгоритмы расчета коэффициента коррекции по принадлежности.

Первый алгоритм – для вычислительной системы «А».

Второй алгоритм – для вычислительной системы «Б».

Вычислительная система «А»

Алгоритм разработан в виде табличного представления значений коэффициентов коррекции в зависимости от параметров, его определяющих (скорости движения, угла наклона траектории, высоты движения, режимов работы внешних систем). Для этого по расчетным формулам (2), (3), (4) заранее насчитываются значения коэффициентов K_H , K_L , которые вносятся в запоминающее устройство специализированной вычислительной системы. При оперативном расчете ОЗ на основе табличных значений K_H , K_L и для заданных аргументов вычисляется искомое значение коэффициента коррекции.

Вычислительная система «Б»

Алгоритм расчета коэффициента коррекции разработан на основе приближенных конечных соотношений.

При разработке алгоритма использован принцип независимости составляющих, обуславливающих СКО отклонений (ΔH , ΔL) [4].

$$\left| \frac{\sigma \Delta L}{\sigma \Delta H} \frac{K_{\Delta L \Delta H}}{\sigma \Delta H} \right|_{\Sigma} = \left| \frac{\sigma \Delta L}{\sigma \Delta H} \frac{K_{\Delta L \Delta H}}{\sigma \Delta H} \right|_{CV} + \left| \frac{\sigma \Delta L}{\sigma \Delta H} \frac{K_{\Delta L \Delta H}}{\sigma \Delta H} \right|_{ATM}. \quad (5)$$

Подстрочные индексы «СУ» и «АТМ» связаны с группами возмущающих факторов, действующих на ЛА, СУ – от внешних систем, АТМ – от возмущений, действующих на атмосферном участке траектории.

Данный принцип позволил распределить зону ответственности по расчету составляющих, определяющих отклонения ΔH , ΔL с одной стороны, предопределил возможность при расчете коэффициента коррекции каждую из составляющих в формулах представить в виде суммы независимых составляющих. Для алгоритма расчета коэффициента коррекции был применен принцип суперпозиции составляющих коэффициента [6].

Кроме того, согласно [5] при умножении приближенных величин относительные погрешности складываются, тогда для уменьшения вычислительной погрешности расчета коэффициента коррекции целесообразно в формулах (2), (3) перейти от среднеквадратических отклонений и коэффициентов корреляции

к корреляционным моментам. С учетом вышесказанного получены соотношения:

$$q_H = \frac{\sigma H_{\Sigma}^2 + K_{HV}}{\sigma H_{\Sigma}^2 + \sigma H_V^2 + 2 \cdot K_{HV}}; \quad (6)$$

$$q_L = q_H - \frac{K_{LH\Sigma}}{\sigma H_{\Sigma}^2 + \sigma H_V^2 + 2 \cdot K_{HV}} \cdot \operatorname{tg} \theta_K. \quad (7)$$

При этом каждая из составляющих (6), (7) представлена аппроксимирующим полиномом [6], аргументами которого являются баллистические параметры (V , θ , H).

Основные расчетные соотношения, определяющие алгоритм расчета коэффициента коррекции, представлены формулами:

1) Вычисляют функции:

$$\sigma H_V = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 \sum_{d=0}^2 h1_{ijd} \cdot \bar{V}^i \cdot \bar{\theta}^j \cdot \bar{H}^d, \quad (8)$$

$$\sigma H^{ATM} = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 \sum_{d=0}^2 h2_{ijd} \cdot \bar{V}^i \cdot \bar{\theta}^j \cdot \bar{H}^d, \quad (9)$$

$$K_{HV} = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 \sum_{d=0}^2 h3_{ijd} \cdot \bar{V}^i \cdot \bar{\theta}^j \cdot \bar{H}^d, \quad (10)$$

$$K_{LH}^{ATM} = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 \sum_{d=0}^2 h4_{ijd} \cdot \bar{V}^i \cdot \bar{\theta}^j \cdot \bar{H}^d. \quad (11)$$

где $h1_{ijd}$, $h2_{ijd}$, $h3_{ijd}$, $h4_{ijd}$ – коэффициенты аппроксимации;
 $\bar{V}^i \cdot \bar{\theta}^j \cdot \bar{H}^d$ – нормированные баллистические параметры.

2) Вычисляют суммарное СКО:

$$\sigma H_{\Sigma} = \sigma H^{CV} + \sigma H^{ATM}, \quad (12)$$

где σH^{CV} поступает во входных данных.

3) Вычисляют суммарный момент $K_{LH\Sigma}$ по формуле:

$$K_{LH\Sigma} = K_{LH}^{CV} + K_{LH}^{ATM}, \quad (13)$$

где K_{LH}^{CV} поступает во входных данных.

4) Вычисляются коэффициенты коррекции q_0 и q_1

$$q_0 = \frac{\sigma H_{\Sigma}^2 + K_{HV}}{\sigma H_{\Sigma}^2 + \sigma H_V^2 + 2 \cdot K_{HV}}. \quad (14)$$

$$q_1 = q_0 - \frac{K_{LH\Sigma}}{\sigma H_{\Sigma}^2 + \sigma H_V^2 + 2 \cdot K_{HV}} \cdot \operatorname{tg} \theta_K. \quad (15)$$

Результаты оценки точности алгоритма расчета коэффициента коррекции

Критерием правильности разработанного алгоритма является выполнение условия:

$$\Delta K_{MET} < \Delta K_{MET}^{ДОП}, \quad (16)$$

или в обозначениях алгоритма расчета коэффициента коррекции:

$$\Delta q_{MET} \leq \Delta q_{MET}^{ДОП}, \quad (17)$$

где $\Delta q_{MET}^{ДОП}$ – допустимая методическая погрешность алгоритма расчета коэффициента коррекции (первое слагаемое в формуле 1);

Δq_{MET} – методическая погрешность определения коэффициента коррекции по разработанному алгоритму.

В свою очередь, Δq_{MET} определяется:

$$\Delta q_{MET} = q^{PAC} - q^{TOCH}, \quad (18)$$

где q^{PAC} – значение коэффициента коррекции, полученное на основе разработанного алгоритма;

q^{TOCH} – значение коэффициента коррекции, полученное при минимальном отклонении функционала (при переборе коэффициентов в заданном диапазоне изменения) при проведении баллистических расчетов и определении вероятностных характеристик срабатывания ЛКС.

Подтверждением выполнения требований, предъявляемых к разработанному алгоритму расчета коэффициента коррекции, являются характеристики, приведенные в таблицах 1 и 2:

– погрешности аппроксимации составляющих коэффициента коррекции (табл. 1, относительные значения);

– значение допустимой (относительной) и расчетной методической погрешности расчета коэффициента Δq_{0MET} , Δq_{1MET} на области определения аргументов (табл. 2).

Как видно из таблицы 2, методическая погрешность алгоритма расчета коэффициентов коррекции (q_0 , q_1) удовлетворяет требованию не превышения допустимой погрешности, что подтверждает обоснованность и корректность разработанного алгоритма.

Выполнена оценка точности (относительной погрешности) срабатывания линейно-корректируемой системы с учетом погрешности

Таблица 1

Характеристики составляющих алгоритма

Характеристики	$\overline{\sigma H_V}$	$\overline{\sigma H^{ATM}}$	$\overline{K_{HV}}$	$\overline{K_{LH}^{ATM}}$
Диапазон изменения составляющих	0,3333–1,0000	0,2–1,0	0,5–1,0	–(0,4–1,0)
Погрешность аппроксимации	0,0095	0,00312	0,00133	0,00849

Таблица 2

Характеристики алгоритма расчета коэффициента коррекции

Диапазон изменения коэффициента коррекции	$\Delta q_{MET}^{ДОП}$	Δq_{0MET}	Δq_{1MET}
0–1	0,1	0,0041	0,0055

алгоритма расчета коэффициента коррекции. Принимая погрешность срабатывания системы за единицу $\sigma^{ТОЧ} = 1$, в случае использования коэффициента коррекции, рассчитанного точным способом, получим, что погрешность срабатывания системы при расчете коэффициента коррекции на основе разработанного алгоритма может увеличиться на 1,5 %, что приведет к незначительному изменению суммарной погрешности срабатывания системы: $\sigma_{АНАЛ} = 1,000112$.

Для проведения исследований, разработки и отработки алгоритмов расчета ОЗ для разных систем срабатывания авторами статьи ранее разработан комплекс программ, позволяющий формировать структуру алгоритмов

расчета ОЗ, рассчитывать числовые характеристики алгоритма, моделировать алгоритмы расчета ОЗ в специализированных вычислительных системах, осуществлять контроль правильности расчета ОЗ.

При разработке нового алгоритма расчета коэффициента коррекции, представляющего одну из компонент алгоритмов расчета ОЗ, комплекс программ доработан и усовершенствован. Схема комплекса программ представлена на рисунке 3.

Научная новизна работы

1) Создан методический аппарат, позволяющий разрабатывать и формировать алгоритм расчета коэффициента коррекции.

Рис. 3. Схема комплекса программ

2) Определена модель погрешности расчета коэффициента коррекции.

3) Разработана методика, определена последовательность проведения расчетов для разработки алгоритма расчета коэффициента коррекции.

4) Разработан алгоритм расчета коэффициента коррекции для реализации в СВС.

Усовершенствован комплекс программ для разработки, отработки и контроля алгоритмов расчета ОЗ. Введены новые блоки в программу функционирования ЛКС, программу аппроксимации, в программу моделирования расчета коэффициента коррекции в СВС.

Практическое внедрение

1. Предложен и реализован в специализированных вычислительных системах «А» и «Б» новый алгоритм расчета коэффициента коррекции ЛКС для оперативного расчета ОЗ, позволивший рационально определить схему, структуру и алгоритмы расчета ОЗ.

2. Разработанный алгоритм расчета коэффициента коррекции обеспечивает оперативность подготовки данных.

3. Значение коэффициента коррекции, вычисленное по разработанному алгоритму, обеспечивает требуемую точность срабатывания линейно-корректируемой системы.

Список литературы

1. Хемминг Р.В. Численные методы. М.: Наука, 1968.
2. Демидович В.П. и др. Основы вычислительной математики. М., 1960.
3. Бусленко Н.А. и др. Метод статистических испытаний, М., 1962.
4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969.
5. Березин И.С., Жидков Н.П. Методы вычислений. Т. 1. М., 1962.
6. Старцева В.Г., Андреев С.Г., Деев С.А., Ушаков Н.А. Повышение точности определения многопараметрической функции при повышенных отклонениях аргументов. Сборник РКТ. Вып. XIV, 1(62). XXIII Макеевские чтения, 2017.

Об авторах

Андреев Сергей Геннадьевич – кандидат технических наук, главный конструктор Федерального государственного унитарного предприятия «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина», Снежинск, Челябинской области, Российская Федерация.

Область научных интересов: аэродинамика, баллистика, динамика полета, алгоритмы систем управления летательными аппаратами.

Доновский Дмитрий Евгеньевич – кандидат технических наук, начальник отдела Федерального государственного унитарного предприятия «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина», Снежинск, Челябинской области, Российская Федерация.

Область научных интересов: аэродинамика, баллистика, динамика полета, алгоритмы систем управления летательными аппаратами.

Старцева Вера Григорьевна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного унитарного предприятия «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина», Снежинск, Челябинской области, Российская Федерация

Область научных интересов: аэродинамика, баллистика, динамика полета, алгоритмы систем управления летательными аппаратами.

Ушаков Николай Алексеевич – начальник отделения Федерального государственного унитарного предприятия «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина», Снежинск, Челябинской области, Российская Федерация.

Область научных интересов: аэродинамика, баллистика, динамика полета, алгоритмы систем управления летательными аппаратами.

Method of correction factor calculation for linear reference systems

Andreev S. G., Donovskiy D. E., Startseva V. G., Ushakov N. A.

Federal State Unitary Enterprise “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics”, Snezhinsk, Chelyabinsk Region, Russian Federation

The paper represents the method of correction factor calculation for linear reference systems along with the algorithm developed for real-time computation of the main task. The correction factor computation algorithm uses the principle of superposition of component functions with each of them represented as an approximation dependence.

Keywords: method, algorithm, main task, correction factor, correlation matrix, numerical data

Information about the authors

Andreev Sergey Gennadievich – Candidate of Engineering Sciences, Chief Designer, Federal State Unitary Enterprise “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics”, Snezhinsk, Chelyabinsk Region, Russian Federation.

Science research interests: aerodynamics, ballistics, flight dynamics, algorithms of aircraft control systems.

Donovskiy Dmitriy Evgenievich – Candidate of Engineering Sciences, Head of Department, Federal State Unitary Enterprise “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics”, Snezhinsk, Chelyabinsk Region, Russian Federation.

Science research interests: aerodynamics, ballistics, flight dynamics, algorithms of aircraft control systems.

Startseva Vera Grigorievna – Candidate of Engineering Sciences, Leading Research Fellow, Federal State Unitary Enterprise “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics”, Snezhinsk, Chelyabinsk Region, Russian Federation.

Science research interests: aerodynamics, ballistics, flight dynamics, algorithms of aircraft control systems.

Ushakov Nikolai Aleksandrovich – Head of Department, Federal State Unitary Enterprise “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics”, Snezhinsk, Chelyabinsk Region, Russian Federation.

Science research interests: aerodynamics, ballistics, flight dynamics, algorithms of aircraft control systems.